مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

انجمن آهن و فولاد ایران



بررسی حضور LDPE بر خواص مکانیکی و رسانایی الکتریکی کامپوزیت سگرگیت CB/HDPE *

مقاله پژوهشی

سید مهران تیموری[۱] سمانه صاحبیان سقی[۲] سید عبدالکریم سجادی[۳]

DOI: 10.22067/jmme.2023.83646.1118

چکیده *با توجه به کاربرد کامپوزیت‌های پایه پلیمری رسانا با ساختار سگرگیت در صنایع الکترونیک و هوافضا، بحث خواص مکانیکی آنها اهمیت پیدا کرده است. در این پژوهش از پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) (High Density Polyethylene)، فاز رسانای کربن سیاه (CB) (Carbon Black) و فاز پلی‌اتیلن با چگالی کم (LDPE) (Low Density Polyethylene) به عنوان فاز تقویت کننده برای ساخت کامپوزیت استفاده شد. در ساخت نمونه‌ها از روش اختلاط مکانیکی و در ادامه از پرس گرم استفاده شد. رسانش نمونه‌ها برای اطمینان از تشکیل ساختار سگرگیت اندازه‌گیری شد. نتایج داده های رسانایی حاکی از شکل گیری ساختار سگرگیت و کاهش مقاومت الکتریکی ساختار سگرگیت با افزایش درصد وزنی کربن سیاه می‌باشد. در نمونه xCB-HD بیشینه رسانایی الکتریکی 43.10 S/m و در نمونه xCB-1LD نیز 36.62 S/m بدست آمد. ارزیابی تصاویر میکروسکوپی نیز تشکیل مسیرهای رسانا در ساختار را تایید می کند. با افزایش فاز رسانای کربنی در مرز گرانول‌ها به سبب ایجاد عیوب ساختاری روند کاهشی استحکام تسلیم در دو دسته ساختار سگرگیت نسبت به پلی اتیلن خالص مشاهده شد. با افزایش درصد وزنی کربن سیاه از ۱ به ۲ درصد وزنی بهبود ۲۰ تا ۴۰ درصدی استحکام تسلیم و ۷ تا ۲۲ درصدی مدول یانگ در ساختارهای سگرگیت xCB-HD و xCB-1LD شد.*

واژه‌های کلیدی ساختار سگرگیت، خواص مکانیکی، رسانایی الکتریکی، کامپوزیت پایه پلیمری، استحکام تسلیم، مدول یانگ.

Effect of Presence LDPE on Mechanical and Electrical Properties of CB/HDPE Segregated Structure

Mehran Teimoury Samaneh Sahebian Seyed Abdolkarim Sajjadi

Abstract

Considering the application of conductive polymer composites with segregated structure in electronics and aerospace industries, their mechanical properties becomes important. In this research, High Density Polyethylene (HDPE), Carbon Black (CB) as conductive phase and Low Density Polyethylene (LDPE) were used as reinforcing phase to make composite. Mechanical mixing followed by hot pressing was used to prepare composites. The conductivity of the samples was measured to ensure the formation of segregated structure. In the xCB-HD sample, the maximum electrical conductivity was 43.10 S/m and in the xCB-1LD sample, it was 36.62 S/m. Evaluation of microscopic images also confirms the formation of conductive paths in the structure, and microscopic images also confirmed the results of electrical conductivity. With the increase of the conductive carbon phase at the boundary of the HDPE granules due to the creation of structural defects, the yield strength decreasing trend was observed compared to pure polyethylene.. By increasing the weight percentage of carbon black from 1 to 2 weight percent, yield strength improved by 20 to 40 percent and Young's modulus by 7 to 22 percent in xCB-HD and xCB-1LD segregated structures.

Keywords Segregated Structure, Mechanical Properties, Electrical Conductivity, Conductive Polymer Composites, Yield Strength, Young's Modulus.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۵/۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۹/۱۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد. **Email**: s.sahebian@um.ac.ir

(۳) استاد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

مقدمه

ساخت کامپوزیت‌های پایه پلیمری با استفاده از پرکننده‌های رسانا یکی از روش‌های دستیابی به ماده‌ای با رسانایی الکتریکی مطلوب می‌باشد. کامپوزیت‌های پایه پلیمری با پرکننده‌های کربنی در اغلب پژوهش‌های کامپوزیت‌های رسانا مورد بررسی قرار گرفته‌اند. معمولا برای دستیابی به بالاترین رسانایی از توزیع تجمعی (ساختار سگرگیت) فاز رسانا در زمینه استفاده می‌شود. عمده کاربرد این کامپوزیت‌ها در زمینه مهندسی الکترونیک و هوافضا می‌باشد [1-4].

زمینه پلیمری مورد استفاده در کامپوزیت‌های پایه پلیمری رسانا، غالبا از جنس ترموپلاست‌ها می‌باشند. از جمله پلیمرهای مذکور می‌توان به پلی‌اتیلن در وزن‌های مولکولی بالا، پلی‌پروپیلن، پلی وینیل کلراید، پلی لاکتیک اسید و پلی اورتان اشاره کرد. با توجه به دارا بودن خواص مطلوبی نظیر سبکی، مقاومت در برابر خوردگی و قیمت مناسب پلیمرها، این مواد همواره از گزینه‌های نخست برای استفاده به عنوان زمینه در کامپوزیت با رسانایی بالا می‌باشند [1-4].

ساخت مواد رسانا از طریق کامپوزیت سازی یکی از روش‌هایی است که موجب کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. فلزات به عنوان فاز رسانا در دسترس ترین مواد محسوب می‌شوند. اما استفاده از مواد کربنی مانند گرافیت، نانولوله کربنی و کربن سیاه به عنوان فاز رسانا در مقایسه با مواد فلزی در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به عنوان یکی از راه‌های کاهش هزینه‌های تولید و دستیابی به خواص الکتریکی برتر می‌باشند. یکی از برتری‌های استفاده از مواد کربنی به عنوان فاز رسانا حد آستانه بسیار کم آن (کمتر از 15 wt%) است، در حالی که استفاده از فاز ثانویه فلزی میزان حد آستانه بین ۳۰ تا ۶۰ درصد وزنی را دارا می‌باشد [1-5].

تا پیش از قرن بیست و یکم، موضوعات تحقیقات و پژوهش‌ها استفاده از توزیع تصادفی برای تولید کامپوزیت‌های رسانا بوده است. اما یکی از چالش‌های اصلی محققین در این نوع ساختارها استفاده کمتر از فاز ثانویه رسانا و کاهش قیمت تمام شده قطعه تولیدی بوده است. پژوهشگران برای دستیابی به یک درصد حجمی کمتر و (حد آستانه) کمتر در تولید این نوع از کامپوزیت‌ها، ساختار سگرگیت را پیشنهاد دادند. با ورود به قرن بیست و یکم، به تدریج مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با ساختار سگرگیت کامپوزیت‌های پایه پلیمری رسانا انجام شد. تا به امروز استفاده از ساختار سگرگیت در کامپوزیت‌های پایه پلیمری رسانا بهترین راهکار برای کاهش درصد حجمی فاز پرکننده در کنار افزایش قابل توجه رسانایی بوده است. رایج ترین روش دستیابی به ساختار سگرگیت استفاده از اختلاط و پرس گرم در دما و فشار کنترل شده می‌باشد [11-13].

یکی از مواردی که کاربری کامپوزیت‌های پایه پلیمری رسانا با ساختار سگرگیت را تحت شعاع قرار داده، خواص مکانیکی آنها می‌باشد. در این دسته از کامپوزیت‌ها با وجود اینکه رسانایی الکتریکی مطلوب با کمترین حد آستانه بدست می‌آید، اما افت خواص مکانیکی نظیر شکل پذیری و چقرمگی آن از چالش‌های جدی این دسته از مواد بوده که کاربری آن را محدود ساخته است. در حقیقت در ساختار سگرگیت کامپوزیت پایه پلیمری، جدایش بین پرکننده‌های رسانا و زمینه ایجاد می‌شود که این امر سبب بوجود آمدن ریز حفره‌هایی در مسیر سگرگیت رسانا می‌شود. حضور ریز حفره‌ها به دلیل سهولت در ایجاد و رشد ترک باعث افت چشمگیر خواص مکانیکی خواهد شد [11-13].

پانگ و همکارانش به بررسی رسانایی و خواص مکانیکی کامپوزیت CNT/UHMWP و CNT/HDPE/UHMWP با ساختار سگرگیت پرداختند. در این پژوهش دو روش اختلاط در حالت محلول و در حالت خشک استفاده شد. ساخت نمونه‌های کامپوزیتی با پرس گرم انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزودن فاز HDPE به کامپوزیت CNT/UHMWP رسانایی افت و خواص مکانیکی افزایش یافته است [5]. زویس و همکارانش کامپوزیت PP/CB با ساختار سگرگیت را به روش قالبگیری پرس گرم با دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و فشار 22.5 KN/cm2 تولید کردند. نتیجه پژوهش آنها دستیابی به رسانایی 1.5 S/cm در حد آستانه ۶٫۵ درصد کربن سیاه بوده است [6]. گوپتا و همکارانش نیز به ارزیابی رفتار رسانایی الکتریکی کامپوزیت ABS/CB با دو نوع توزیع تصادفی و سگرگیت پرداختند. طبق پژوهش آنها حد آستانه کربن سیاه در توزیع تصادفی ۲٫۷ درصد حجمی و در توزیع سگرگیت ۰٫۰۰۵۴ درصد حجمی بوده است. همچنین براساس نتایج این پژوهش، رسانایی الکتریکی ساختار سگرگیت به وضوح خیلی بیشتر از توزیع

تصادفی بوده که دلیل اصلی آن ایجاد مسیرهای رسانایی است که در ساختار سگرگیت بصورت منظم وجود دارد، توجیه شده است [7]. کین مینگ لیوو و همکارانش در رابطه با ساختار سگرگیت فاز ثانویه در کامپوزیت PVDF/CNT با سرعت‌های اختلاط مکانیکی متفاوت و تاثیر آن بر رسانایی الکتریکی و حد آستانه پژوهشی را انجام دادند. طبق نتایج این پژوهش میزان رسانایی الکتریکی مطلوب برای کامپوزیت PVDF/CNT در زمان بهینه ۲ دقیقه بود. همچنین حد آستانه CNT در این پژوهش ۰,۰۷۸ درصد بدست آمد [8]. داوی ژو و همکارانش در پژوهشی به بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت POE /CNT با ساختار سگرگیت پرداختند. آنها نمونه‌های کامپوزیتی را به دو روش تف جوشی انتخابی از طریق میکروامواج و قالبگیری فشاری گرم تولید کردند. با بررسی نتایج خواص مکانیکی، در درصدهای مختلف حجمی CNT میزان استحکام کششی در نمونه‌های ساخته شده به روش تف جوشی انتخابی از طریق میکروامواج به مراتب بیشتر از نمونه‌های قالبگیری فشاری گرم می‌باشد. همچنین از نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که میزان ازدیاد طول در لحظه شکست در نمونه‌های ساخته شده به روش تف جوشی انتخابی از طریق میکروامواج افزایش ۵۱۰ درصدی در مقایسه با نمونه‌های قالبگیری فشاری گرم داشته است [11]. وان چنگ یو و همکارانش تحقیقی را بر روی تاثیر روش تولید بر خواص مکانیکی کامپوزیت PVDF/CNT با ساختار سگرگیت انجام دادند. در این پژوهش از قالبگیری اکستروژن و پرس گرم برای تولید کامپوزیت مورد نظر استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده در مقایسه بین دو روش تولیدی، استحکام کششی و انعطاف پذیری کامپوزیت تولیدی با روش اکستروژن بیشتر و مدول یانگ کامپوزیت‌های تولیدی با روش پرس گرم مطلوب تر بود [9].

در پژوهش‌های مختلفی که از گذشته تاکنون در رابطه با خواص مکانیکی و رسانایی الکتریکی کامپوزیت های پایه پلیمری با پرکننده‌های کربنی رسانا و با ساختار سگرگیت انجام شده، راه هایی برای بهبود خواص مکانیکی ساختار های سگرگیت ارائه شده است. در این پژوهش سعی شده تا رسانایی الکتریکی و خواص مکانیکی کامپوزیت CB/HDPE در حضور و عدم حضور LDPE بررسی شود. روش آماده سازی نمونه‌ها براساس اختلاط مکانیکی و قالبگیری پرس گرم انتخاب شد.

مواد و روش تحقیق

مواد اولیه

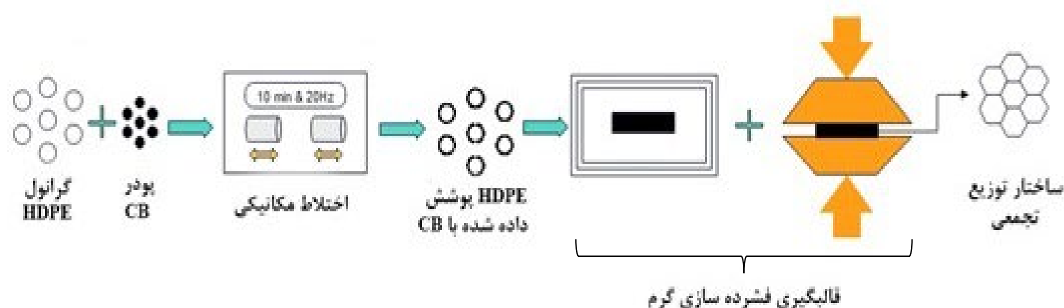
فاز زمینه کامپوزیت موردنظر در این پژوهش پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) می‌باشد که بصورت پودر از شرکت بسپار تجارت آسسیا خریداری شسده که دارای ابعادی در بازه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرون، نقطه ذوب 127 ℃ و چگالی $0.952\ g/cm^3$ می‌باشد. کربن سیاه (CB) با گرید N220 از شرکت سیمرغ به عنوان فاز رسانا در کامپوزیت موردنظر استفاده شد؛ اندازه ذرات کربن سسیاه مورد اسستفاده بین ۲۰ تا ۵۰ نانومتر، چگالی آن $2\ g/cm^3$ و رسانایی ذاتی آن $10^3\ S/m$ است. در این پژوهش از گرانول‌های پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) تهیه شسده از پتروشیمی امیرکبیر به عنوان فاز تقویت کننده ثانویه استفاده شد. چگالی LDPE موردنظر $0.924\ g/cm^3$ و دمای ذوب آن 115 ℃ می‌باشد.

آماده سازی نمونه‌های کامپوزیتی

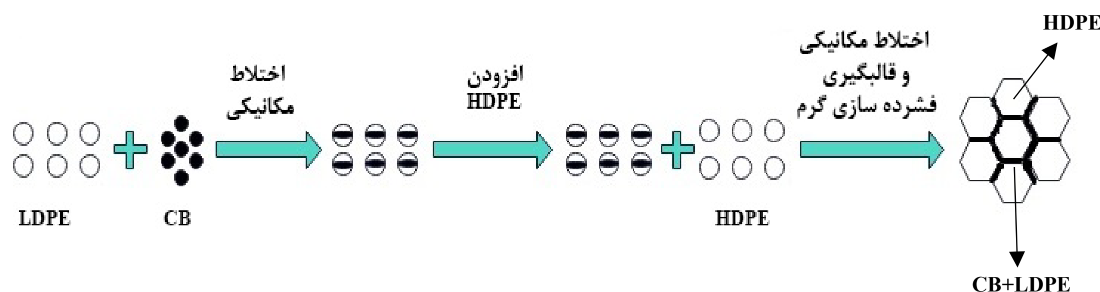
برای تهیه نمونه‌های مورد آزمایش در پژوهش پیش رو دو نوع ماده کامپوزیتی تهیه شده است. اولین دسته نمونه‌ها مربوط به کامپوزیت CB/HDPE و بدون حضور LDPE می‌باشد. دومین دسته نمونه‌ها مربوط به کامپوزیت CB/LDPE/HDPE با حضور ۰,۵ درصد LDPE می‌باشد. در هر دو دسته این نمونه‌ها میزان درصد وزنی کربن سیاه (CB) به عنوان فاز ثانویه شامل ۰,۲، ۰,۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ می‌باشد.

شماتیک فرآیند ساخت نمونه‌های مربوط به کامپوزیت CB/HDPE با ساختار سگرگیت در شکل (۱) آورده شده است. طبق شماتیک شکل (۱)، ابتدا درصد وزنی مشخصی از کربن سیاه (CB) با پودر پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) مخلوط و اختلاط مکانیکی پودرهای CB/HDPE با فرکانس 20 Hz با مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام شد. سپس با استفاده از روش قالبگیری فشرده سازی گرم با فشار ۱۶ تن، مدت زمان مشخص و دمای بین ۱۲۲ تا ۱۲۴ درجه سانتیگراد نمونه‌هایی با ابعاد $40*10*1\ mm^3$ جهت انجام آزمایشات مورد نظر آماده گردید.

شماتیک فرآیند ساخت نمونه‌های مربوط به کامپوزیت CB/LDPE/HDPE با ساختار سگرگیت در شکل (۲) آمده است. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی CB/LDPE/HDPE، ابتدا درصد مشخصی از پودر کربن سیاه (CB) و ۰٫۵ درصد وزنی از پودر پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) به مدت ۵ دقیقه با فرکانس 20 Hz تحت اختلاط مکانیکی قرار گرفت. سپس پودر حاصله از این اختلاط به مدت ۵ دقیقه در نیتروژن مایع قرار گرفت و اختلاط مکانیکی آن با درصد وزنی مشخصی از پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) با فرکانس 20 Hz و مدت زمان ۱۰ دقیقه انجام شد. سپس قالبگیری فشرده سازی گرم با فشار ۱۶ تن، ۱۲۲ تا ۱۲۴ درجه سانتیگراد و مدت طمان مشخص انجام شد تا نمونه‌هایی با ابعاد 40*10*1 mm3 جهت انجام آزمایشات مورد نظر آماده شود. در ادامه نحوه نام گذاری نمونه‌های کامپوزیتی در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱ شماتیک فرآیند ساخت نمونه‌های کامپوزیتی CB/HDPE



شکل ۲ شماتیک فرآیند ساخت نمونه‌های کامپوزیتی CB/LDPE/HDPE

جدول ۱ نامگذاری نمونه‌های کامپوزیتی CB/HDPE و CB/LDPE/HDPE

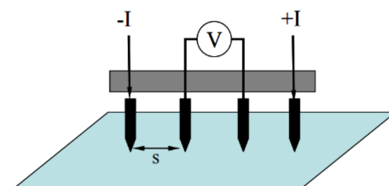
x=%wt CB	xCB-HD	xCB-0.5LD
0.2	0.2CB-HD	0.2CB-0.5LD
0.5	0.5CB-HD	0.5CB-0.5LD
1	1CB-HD	1CB-0.5LD
2	2CB-HD	2CB-0.5LD
3	3CB-HD	3CB-0.5LD
4	4CB-HD	4CB-0.5LD
5	5CB-HD	5CB-0.5LD

رسانایی الکتریکی

به منظور بررسی رسانایی الکتریکی نمونه‌های کامپوزیتی از دستگاه چهار پراب چهار نقطه مجهز به الکترومتر ساخت شرکت Keithley مدل ۲۴۵۰ استفاده شده است. این دستگاه مقاومت الکتریکی سطح نمونه را اندازه گیری کرده و با استفاده از رابطه (۱) می‌توان آن را به رسانایی الکتریکی تبدیل کرد.

$$\sigma = \frac{l}{R_e W t} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، σ بیانگر رسانایی الکتریکی با واحد S/m، l طول نمونه با واحد متر (m)، W عرض نمونه با واحد متر (m)، t ضخامت نمونه با واحد متر (m) و R_e مقاومت الکتریکی اندازه‌گیره شده با واحد اهم (Ω) است.



شکل ۳ شماتیک دستگاه پروب چهار نقطه‌ای [10]

خواص مکانیکی

به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی از آزمون کشش استفاده شد. آزمون کشش توسط دستگاه یونیورسال ساخت شرکت SANTAM، دارای نیروسنج BONGSHIN و مدل DBBP-50 با سرعت 0.5 mm/min در دمای محیط انجام شد. در این آزمون ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش 40*10*1 mm3 با طول مشخصه 20 mm در نظر گرفته شد.

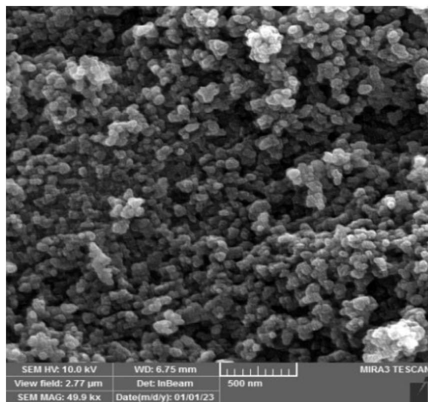
تصاویر میکروسکوپی FESEM

به منظور بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی حاصل از آزمون کشش و همچنین سطح گرانول‌های پلی‌اتیلن (HDPE) پوشش داده شده با کربن سیاه (CB) با استفاده از دستگاه FESEM مدل TESCAN BRNO-Mira3 LMU با ولتاژ 10 kV انجام شد. جهت آماده سازی نمونه‌ها از پوشش طلا به عنوان ماده‌ای رسانا استفاده شد.

نتایج و بحث

مطالعه ریز ساختاری

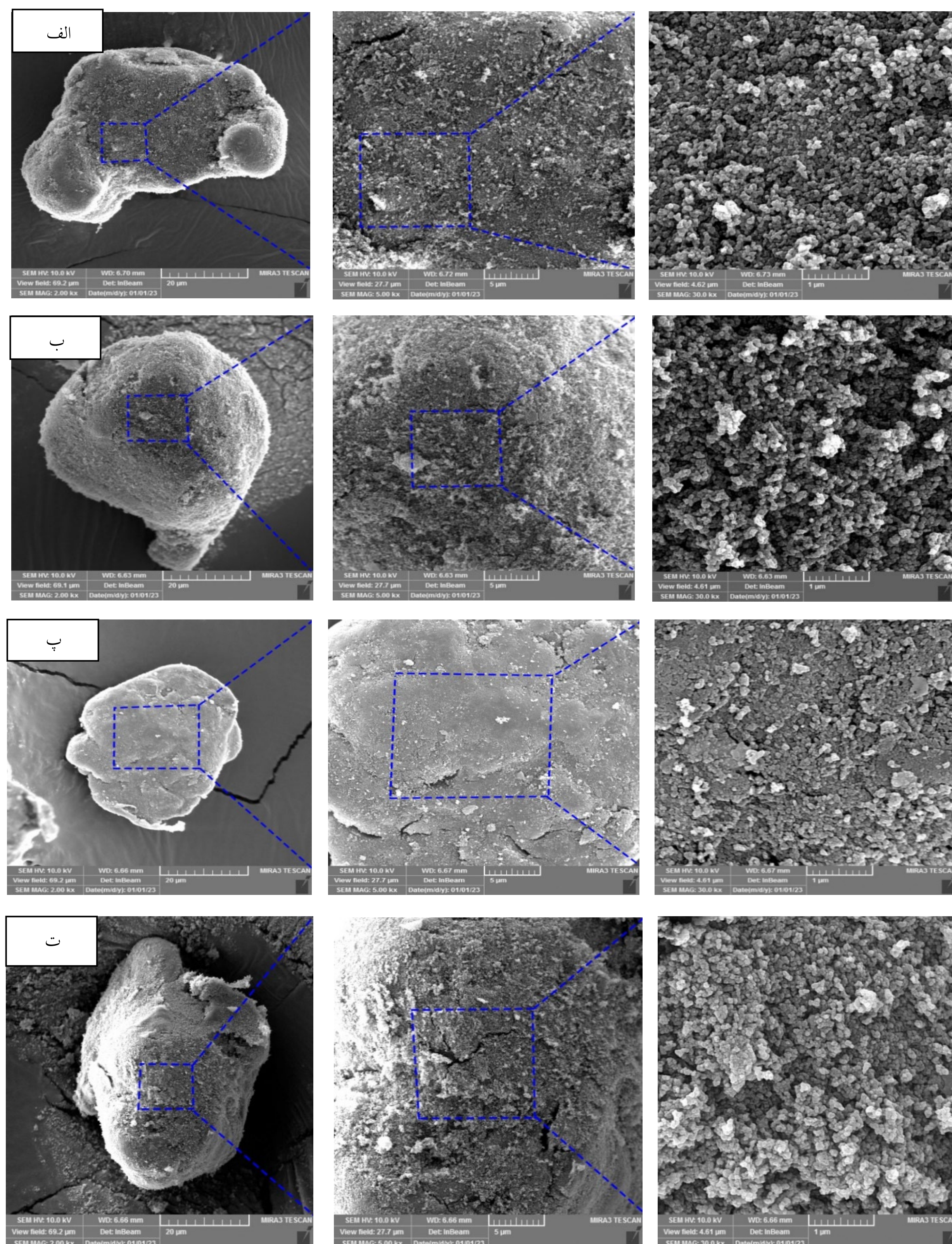
در شکل (۵) تصاویر FESEM پودرهای 1CB-HD، 4CB-HD، 1CB-0.5LD و 4CB-0.5LD پس از اختلاط مکانیکی آورده شده است. سطح شکست حاصل از آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیتی 1CB-HD و 2CB-0.5LD در شکل (۶) آمده است. در شکل (۵–الف، ب، پ و ت) پوشش ایجاد شده گرانول‌های HDPE توسط فاز رسانا CB به خوبی قابل مشاهده است. همانطور که مشاهده می‌شود میزان پوشش دهی پودر 1CB-HD (شکل ۴–الف) در مقایسه با پودر 4CB-HD (شکل ۵–ب) کمتر است که به علت تفاوت میزان درصد CB می‌باشد.



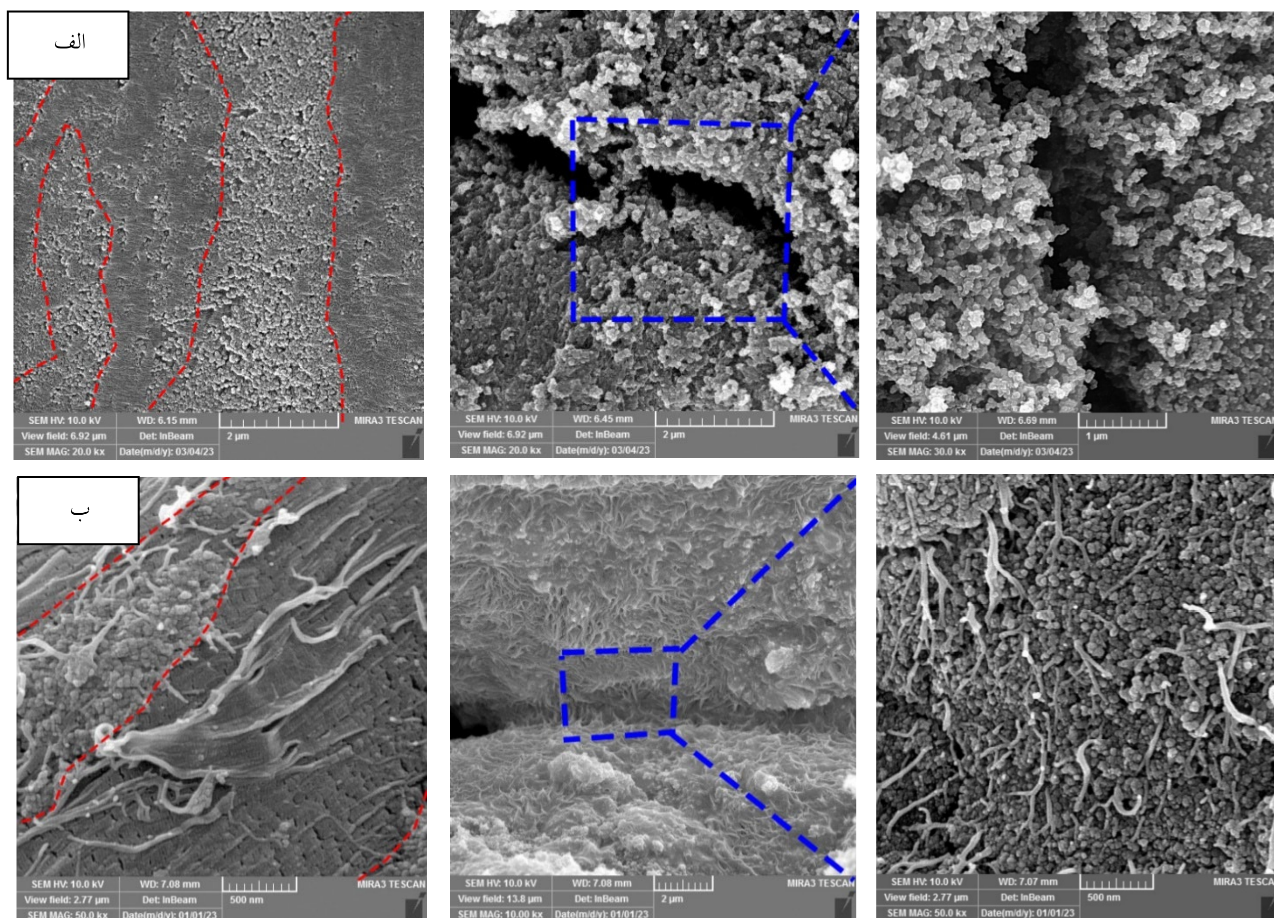
شکل ۴ تصویر FESEM از پودر اولیه کربن سیاه (CB)

طبق مشاهدات شکل (۶–الف و ب)، نواحی با ساختار سگرگیت فاز ثانویه کربن سیاه (CB) بصورت خط چین از نواحی زمینه پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE) متمایز شده‌اند. این تصاویر نشان می‌دهند که روند نمونه سازی برای تشکیل شبکه رسانا با ساختار سگرگیت به درستی انجام شده که باعث افزایش رسانایی الکتریکی نمونه در مقایسه با توزیع تصادفی فاز ثانویه در درصد مشابهی از پرکننده می‌شود.

با مقایسه سطح شکست دو کامپوزیت 2CB-HD (شکل ۶–الف) و 2CB-0.5LD (شکل ۶–ب) می‌توان دریافت که نوع شکست متفاوت بوده است. در کامپوزیت 2CB-HD شکست ترد رخ داده و در کامپوزیت 2CB-1LD شکست نرم اتفاق افتاده است. دلیل تفاوت در مد شکست به علت حضور فاز LDPE است که باعث ایجاد اتصال مطلوبتر گرانول‌ها در نمونه 2CB-0.5LD شود. در هنگام شکست می‌توان رشته‌های کشیده شده LDPE و HDPE را در مرز مناطق CB و HDPE مشاهده کرد که نشان از شکست نرم است.در حقیقت فاز LDPE در مرز فازهای HDPE و کربن سیاه در حین فرآیند تولید ذوب شده و در مرز مشترک گرانول‌ها و در بین ذرات CB نفوذ کرده و سبب تشکیل میکرو فیبریل‌ها در سطح شکست نمونه شده است.



شکل ۵ تصاویر FESEM از: (الف) پودر 1CB-HD، (ب) پودر 4CB-HD، (پ) پودر 1CB-0.5LD، (ت) پودر 4CB-0.5LD، در بزرگنمایی‌های متفاوت



شکل ۶ تصاویر FESEM از سطح شکست: (الف) کامپوزیت 2CB-HD و (ب) کامپوزیت 2CB-0.5LD در بزرگنمایی‌های متفاوت

ارزیابی رسانایی الکتریکی

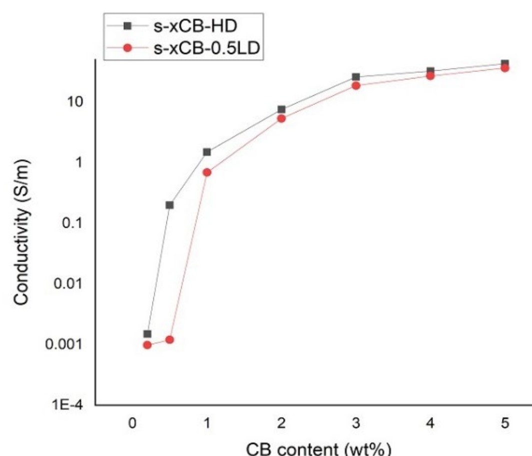
رسانایی الکتریکی دو دسته از نمونه‌های کامپوزیتی xCB-HD و xCB-1LD با درصدهای مختلفی از کربن سیاه (CB) و مقدار ثابت 0.5 درصد وزنی پلی اتیلن با چگالی کم (LDPE) با ا ستفاده از رابطه (۱) اندازه‌گیری و در جدول (۲) گزارش شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی فاز ثانویه CB از ۰,۲ تا ۵ درصد، میزان رسانایی الکتریکی روند صعودی دارد. مطابق جدول (۲)، بیشترین میزان رسانایی مربوط به نمونه‌های 5CB-HD و 5CB-0.5LD بوده و مقادیر آنها به ترتیب 43.10 S/m و 36.62 S/m می‌باشد. با توجه به اینکه ر سانایی 0.2 S/m تا 40000 S/m بیانگر ماده ای ر سانا می‌باشد [2]؛ بنابراین در این پژوهش ساختارهای سگرگیت تولیدی در دسته مواد رسانای الکتریکی قرار دارد.

با مقایسه دو نوع نمونه xCB-HD و xCB-0.5LD می‌توان دریافت که با افزودن مقدار (۰,۵ درصد وزنی) LDPE به نمونه، میزان رسانایی الکتریکی کاهش یافته است. دلیل این امر نفوذ LDPE در بین دانه‌های کربن سیاه و گرانول‌های HDPE ا ست که در تشکیل مسیر رسانا اختلال ایجاد می‌کند. البته ذکر این نکته ضروری ا ست که با ذوب LDPE در مرزدانه، ریز حفرات موجود در فصل مشترک نیز کاهش می‌یابد که در مقادیر کم فاز LDPE تاثیر مطلوبی بر خواص مکانیکی خواهد داشت.

جدول ۲ نتایج رسانایی الکتریکی برای دو نوع کامپوزیت xCB-HD و xCB-1LD

Conductivity (S/m)

xCB-1LD	xCB-HD	%wt CB
9.8×10^{-4}	0.0015	0.2
1.2×10^{-3}	0.20	0.5
0.69	1.49	1
5.39	14.89	2
18.75	26.11	3
27.08	32.63	4
36.62	43.10	5



شکل ۷ تغییرات رسانایی الکتریکی بر حسب درصد وزنی CB در دو کامپوزیت xCB-HD و xCB-0.5LD

برای محاسبه میزان حد آستانه دو نوع کامپوزیت xCB-HD و xCB-1LD از رابطه (۲) استفاده شد. با انجام محاسبات، حد آستانه کامپوزیت xCB-HD برابر با 0.0814 %vol و حد آستانه کامپوزیت xCB-1LD برابر با 0.061 %vol بدست آمد. در حقیقت با افزودن LDPE میزان حد آستانه کامپوزیت موردنظر کاهش یافته است. علت آن این است که در درصدهای وزنی کم کربن سیاه، حضور فاز LDPE سبب کاهش حفرات و ناپیوستگیهای ساختاری در نمونه شده و مسیرهای بهم پیوسته فاز رسانا راحتتر تشکیل می شود. این امر باعث می‌شود که در درصدهای وزنی پایین‌تری از CB نخستین شبکه‌های رسانا یا به عبارتی گذار عایق/رسانا دیده شود.

ارزیابی خواص مکانیکی

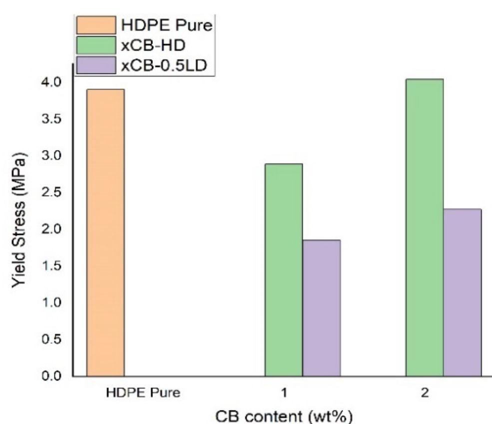
آزمون کشش تک محوره برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شد. در این پژوهش نمونه‌های HDPE خالص با ذوب ناقص، 1CB-HD، 1CB-0.5LD، 2CB-HD و 2CB-0.5LD تحت آزمون کشش تک محوره قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از آزمون کشش در جدول (۳) آورده شده است.

با توجه به داده های جدول (۳) و شکل (۸)، به سبب ذوب ناقص گرانولهای پلی اتیلن و وجود نقایص ساختاری مانند حفرات و فصل مشترک ضعیف بین دو فاز، خواص مکانیکی دو دسته ساختار سگرگیت کمتر از نمونه پلیمری خالص می‌باشد. با افزودن فاز تقویت کننده کربنی میزان تنش مورد نیاز برای شروع تغییر شکل پلاستیک یا بعبارتی تنش مورد نیاز برای تغییر کانفورماسیون زنجیره های پلیمری روند کاهشی را از خود نشان می دهد. میزان سطح در تماس کم بین دو فاز کربن سیاه و پلی اتین در توزیع سگرگیت، سبب تاثیرپذیری اندک تغییرات کانفورماسیونی زنجیره های پلیمری نسبت به توزیع رندوم است. بر این اساس با توجه به شکل (۸) میزان تنش مورد نیاز برای تغییر شکل پلاستیک در نمونه xCB-HD روند ثابتی را از خود نشان می دهد.

جدول ۳ نتایج خواص مکانیکی با ساختار سگرگیت کامپوزیت xCB-HD و xCB-0.5LD با ساختار سگرگیت

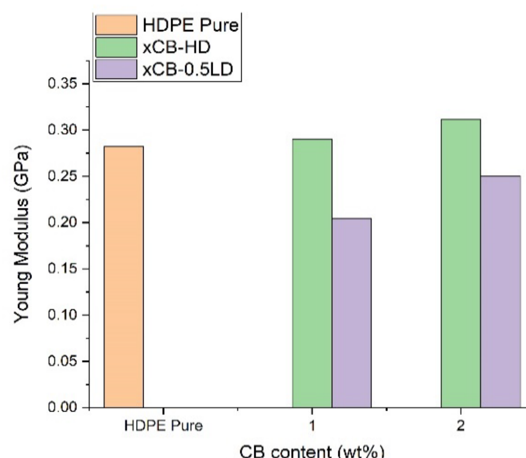
خواص مکانیکی

نمونه	مدول یانگ (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)
HDPE	0.282	3.9
1CB-HD	0.290	2.89
1CB-0.5LD	0.204	1.85
2CB-HD	0.311	4.04
2CB-0.5LD	0.250	2.27



شکل ۸ تغییرات استحکام تسلیم بر حسب درصد وزنی CB در دو کامپوزیت xCB-HD، xCB-0.5LD و نمونه HDPE خالص

با افزایش فاز نرم LDPE در فصل مشترک میزان نقایص ساختاری کاهش یافته و اما مقاومت کم این فاز در برابر تغییر شکل پلاستیک سبب کانفورماسیون راحتتر زنجیره های پلیمری در سطوح تنشی کمتر می گردد. این روند در درصد وزنی یک درصد به طور واضح مشاهده می شود. با افزایش درصد وزنی کربن سیاه به دو درصد وزنی، تاثیر فاز نرم میکرونی در فصل مشترک با حضور نانو ذرات کربن سیاه کاهش یافته و روند افزایشی تنش تسلیم دیده می شود. هر چند روند کاهشی استحکام تسلیم در دسته کامپوزیت xCB-1LD نسبت به پلی اتیلن خالص و ساختار سگرگیت xCB-HD وجود دارد.



شکل ۹ تغییرات مدول یانگ بر حسب درصد وزنی CB در دو کامپوزیت xCB-HD ، xCB-0.5LD و نمونه HDPE خالص

با توجه به شکل (۹)، با افزایش درصد وزنی کربن سیاه در دو دسته ساختار سگرگیت، مدول یانگ روند افزایشی را از خود نشـــان می دهد. قرار گیری فاز LDPE در مرز گرانولها و ما بین نانو ذرات کربنی مشابه قبل سبب افزایش نرمی ساختار و سفتی کمتر نسبت به دو دسته پلی اتیلن خالص و ساختار سگرگیت xCB-HD شده است.

نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش اختلاط خشک و قالب گیری فشرده سازی گرم نمونه‌های کامپوزیتی xCB-HD و xCB-0.5LD با ساختار سگرگیت جهت ارزیابی رسانایی الکتریکی و خواص مکانیکی ساخته شدند. توزیع تجمعی CB در زمینه HDPE در افزایش رسانایی الکتریکی بسیار مطلوب بوده است؛ بطوریکه در نمونه xCB-HD بیشینه رسانایی الکتریکی 43.10 S/m و در نمونه xCB-1LD نیز 36.62 S/m بدست آمد که با توجه به ارزیابی تصاویر میکروسکوپی نیز می‌توان تشکیل ساختار سگرگیت و دستیابی به میزان مطلوب رسانایی الکتریکی را ادعا کرد. افزودن ۰,۵ درصد LDPE باعث افت رسانایی الکتریکی و همچنین کاهش حد آستانه تا 0.037 %vol شده است. اما افزودن LDPE بهبودی را در خواص مکانیکی مانند استحکام تسلیم و مدول یانگ بوجود نیاورد.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] J. Tiusanen., D. Vlasveld., J. Vuorinen., "Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts", *Composites Science and Technology*, vol. 72, no. 14, pp. 1741-1752, (2021).

[2] H. Pang, L. Xu, D-X Yan, Z-Ming, "Conductive polymer composites with segregated structures", *Progress in Polymer Science*, Vol. 39, Issue 11, pp. 1908-1933, (2014).

[3] J. C. Grunlan, W. W.Gerberich, L. F.Francis, “Lowering the percolation threshold of conductive composites using particulate polymer microstructure", *J Appl Polym Sci*, Vol. 80, pp. 692–705. (2001).

[4] J. C. Grunlan, W. W.Gerberich, L. F.Francis, "Electrical and mechanical behavior of carbon black-filled poly(vinyl acetate) latex-based composites", *Polym Eng Sci,* Vol. 41, pp. 1947–62, (2001).

[5] H. Pang, D. X.Yan, Y Bao, J. B.Chen, C.Chen, Z. M.Li, "Super-tough conducting nanotube/ultrahigh-molecular-weight polyethylene composites with segregated and double-percolated structure", *Journal Mater Chemistry*, Vol. 22, pp. 23568–75. (2012).

[6] H.Zois, L.Apekis, M.Omastova, "Electrical Properties of Carbon Black-filled Polymer Composites", *Macromolecular Symposia,* Vol. 170, pp. 249-256, (2001).

[7] S.Gupta, R.Ou, and R.A.Gerhardt, "Effect of the fabrication method on the electrical properties of poly(acrylonitrile-co-butadiene-costyrene)/carbon black composites", *Journal Electronic Materials,* Vol. 35, pp. 224–229, (2006).

[8] Q.Liu, J.Tu, X.Wang, W.Yu, W.Zheng, Z.Zhao, "Electrical conductivity of carbon nanotube/poly(vinylidene fluoride) composites prepared by high-speed mechanical mixing", *Carbon*, Vol. 50, pp. 339-341, (2012).

[9] W. Ch.Yu, T.Wang, , G.Q.Zhang, Z. G.Wang, H. M.Yin, D. X. Yan, J. Zh. Xu,, Z. M. Li, "Largely enhanced mechanical property of segregated carbon nanotube/ poly (vinylidene fluoride) composites with high electromagnetic interference shielding performance", *Composites Science and Technology*, Vol. 167, pp. 260-267, (2018).

[10] Y.S.Kim, "Electrical Conductivity of Segregated Network Polymer Nanocomposites", (2007).

[11] D. Xu, , Ch. Wenhua, L. Pengju, "Enhanced electromagnetic interference shielding and mechanical properties of segregated polymer/carbon nanotube composite via selective microwave sintering", *Composites Science and Technology*, Vol. 199, pp. 108–355, (2020).

[12] T. Jiahong, Y. Fan, X. Yeping, L. Pengju, "Improved mechanical and electromagnetic interference shielding performance of segregated UHMWPE/CNTs via microwave-assisted sintering", *High Performance Polymer,* pp. 1140-1149, (2020.

[13] S. Moazen, S. Sahebian, M. Haddad Sabzevar, “Low percolation behavior of HDPE/CNT nanocomposites for EMI shielding application: Random distribution to segregated structure", *Synthetic Metals,* Vol. 281, 116900, (2021).